

Литература

1. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. – Москва, 2012. – № 5. – С. 74 – 78.
2. Горшков В.С., Москвиллин Е.А., Хасанов И.Р. Оценка параметров тушения лесных пожаров авиационными средствами // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников: сборник тезисов научно-практической конференции. – Москва, 2001. – Т. 1. – С. 34 – 35.
3. Душкин А.Л., Ловчинский С.Е. Взаимодействие пламени горючей жидкости с тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. Москва, 2011. – №11. – С. 53 – 55.
4. Хасанов И.Р., Москвиллин Е.А. Авиационные методы тушения крупных лесных пожаров // Авиационные методы тушения крупных лесных пожаров. Москва, 1999. – № 2. – С. 300 – 301.
5. W.H. Lee. A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Modeling. Technical Report LA-UR 79-975, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 1979.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**

**Ю.К. Атрошенко, А.А. Бычкова**

Научный руководитель профессор П.А. Стрижак

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия**

Температура (наряду с расходом и давлением) является важнейшим параметром, характеризующим процесс добычи и транспортировки нефти и газа. Измерения температуры выполняется как для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности, так и для косвенного измерения других параметров: плотности, массы [1]. Основные измеряемые параметры – температура, давление и скорость движения нефти – являются параметрами, оказывающими влияние на показатели качества нефти, в том числе на ее вязкость [2, 3]. В системах контроля и управления процессами добычи и транспортировки газа температура технологической среды является параметром, характеризующим процесс изменения объема газа, учет которого необходим для регулирования расхода газа и обеспечения максимальной точности определения объема газа, проходящего через сечение трубопроводов [4]. В соответствии с установленными требованиями [1] погрешность измерения температуры не должна превышать 0,2 К. Поэтому обеспечению точности температурных измерений следует уделять повышенное внимание.

Известно [5], что на погрешность измерения значительное влияние может оказывать способ монтажа датчика в трубопроводе, однако учесть реальные условия измерений на практике не просто. Для анализа влияния условий измерения температуры могут применяться методы численного моделирования процесса теплопереноса в чувствительных элементах преобразователей температуры [6, 7]. В ходе разработки модели решается ряд задач, в том числе вопрос о нахождении оптимального соотношения учета влияющих на результат факторов и длительности решения задач с помощью технических средств. Одним из влияющих факторов на результаты численного моделирования является аппроксимация теплофизических характеристик материалов [7].

Целью настоящей работы является исследование влияния аппроксимации теплофизических характеристик (ТФХ) материалов – элементов модели на результаты численного моделирования термоэлектрических преобразователей, используемых для измерения температуры технологических сред на нефтяных и газовых месторождениях.

Схема области решения задачи теплопереноса для чувствительного элемента термоэлектрического преобразователя показана на рисунке 1.

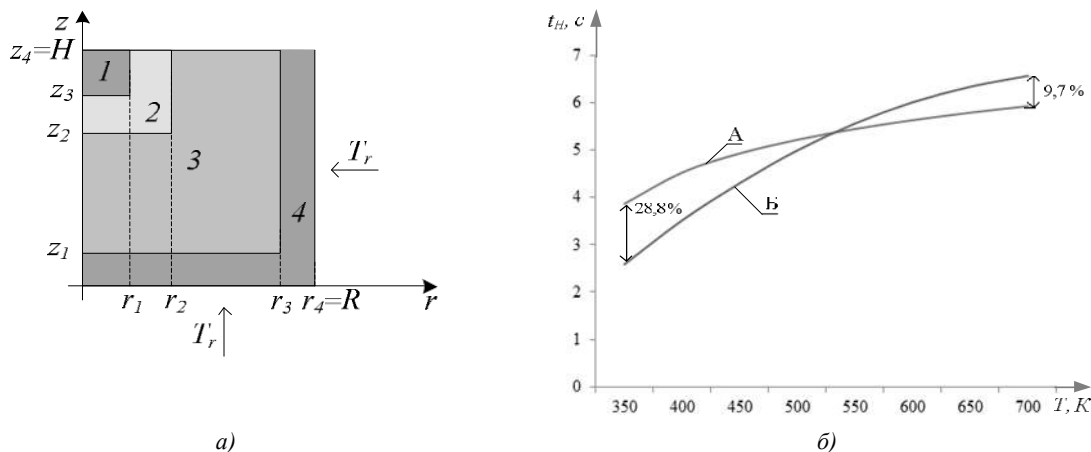


Рис.1 Схема области решения задачи теплопереноса (а) и результаты численного моделирования (б): 1 – спай термопары; 2 – защитный колпачок; 3 – порошок оксида алюминия; 4 – металлический чехол; А – результаты с постоянными значениями ТФХ; Б – результаты с аппроксимированными значениями ТФХ

Для области решения (рисунок 2.1.3) математическая модель включает следующие дифференциальные уравнения:

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial t_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right), t > 0, 0 < r < r_1, z_3 < z < H; \quad (1)$$

$$c_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial t_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 t_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_2}{\partial z^2} \right), t > 0, 0 < r < r_2, z_2 < z < z_3; t > 0, r_1 < r < r_2, z_3 < z < H; \quad (2)$$

$$c_3 \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial t_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 t_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_3}{\partial z^2} \right), t > 0, 0 < r < r_3, z_1 < z < z_2; t > 0, r_2 < r < r_3, z_2 < z < H; \quad (3)$$

$$c_4 \cdot \rho_4 \cdot \frac{\partial t_4}{\partial t} = \lambda_4 \left( \frac{\partial^2 t_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_4}{\partial z^2} \right), t > 0, 0 < r < L, 0 < z < z_1; t > 0, r_3 < r < r_4, z_1 < z < H. \quad (4)$$

Здесь  $r$  – радиальная координата, м;  $z$  – осевая координата, м;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); индексы: 1 – спай термопары, 2 – защитный керамический колпачок; 3 – порошок окиси алюминия, 4 – защитный чехол.

Начальные условия определяют распределение температуры в чувствительном элементе (спае) ТЭП в начальный момент времени:  $t=0$ ;  $T=T_0$ ,  $0 < r < R$ ,  $0 < z < H$ , где  $T_0 = 293$  К – температура, соответствующая нормальным условиям.

На границах «спай термопары – керамический колпачок» ( $r=r_1$ ,  $z=z_3$ ), «керамический колпачок – порошок  $Al_2O_3$ » ( $r=r_2$ ,  $z=z_2$ ), «порошок  $Al_2O_3$  – защитный чехол» ( $r=r_3$ ,  $z=z_1$ ) заданы граничные условия IV рода аналогично приведенным в работах [5–7].

Область решения задачи (рис. 1) представляет равномерную сетку из 200 узлов. Шаг сетки по радиальной координате равен  $2,5 \cdot 10^{-2}$  мм, по осевой координате –  $2,5 \cdot 10^{-2}$  мм. Шаг по временной сетке изменялся в диапазоне от  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$  с для уменьшения объема вычисления и повышения точности решения.

Системы уравнений (1)–(4) с соответствующими начальными и граничными условиями решались с применением метода конечных разностей. Решение разностных аналогов дифференциальных уравнений, представляющих собой линейные алгебраические уравнения, проводилось локально-одномерным методом. Для решения системы разностных уравнений применялся метод прогонки на основе неявной четырехточечной схемы [8].

Достоверность результатов численного моделирования оценивалась в соответствии с алгоритмами проверки консервативности используемых разностных схем [9].

Аппроксимация теплофизических характеристик выполнена по справочным данным [10].

На рисунке 1, б приведены зависимости минимально необходимого времени работы чувствительного элемента датчика для получения достоверных результатов измерений при использовании постоянных (1) и аппроксимированных теплофизических характеристик (2). Видно (рис. 1, б), что максимальное относительное отклонение результатов составляет не более 30 %. Использование аппроксимационных выражений позволяет повысить точность вычислений, однако при этом в значительной степени увеличивается длительность и трудоемкость вычислений. Поэтому при прогнозировании основных параметров исследований можно в первом приближении применять допущение о постоянстве теплофизических характеристик материалов основных элементов термоэлектрических преобразователей.

Полученные результаты показали, что отклонение результатов численного моделирования при использовании аппроксимированных теплофизических характеристик позволяет повысить точность определения интегральных характеристик процесса теплопереноса в чувствительном элементе термоэлектрического преобразователя при измерении температуры нефти и газа до 30 %. Полученные результаты могут быть использованы для введения поправки на результаты численного моделирования, полученные при использовании постоянных теплофизических характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 2.1321.2014).

#### Литература

1. ГОСТ 8.589-2007. Государственная система обеспечения единства измерений. Ведение учетных операций на пунктах приема-сдачи нефти в нефтепроводных системах. – М.: Стандартиформ, 2009. – 43 С.
2. ГОСТ 2517-2012. Нефть и нефтепродукты, Методы отбора проб. – М.: Стандартиформ, 2014. – 38 С.
3. Bassane J.F.P., Sad C.M.S., Neto D.M.C., Santos F.D., Silva M., Tozzi F.C., Filgueiras P.R., de Castro E.V.R., Romão W., Santos M.F.P., da Silva J.O.R., Lacerda J.V. Study of the effect of temperature and gas condensate addition on the viscosity of heavy oils // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – P. 163–169.
4. Белов Д.Б. Анализ влияния температуры природного газа в трубопроводе на его объем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 6-1. – С. 25 – 31.
5. Атрошенко Ю.К., Стрижак П.А. О влиянии защитной гильзы на погрешность измерения температуры термоэлектрическими преобразователями // Энергетик. – 2015. – № 10. – С.52–55.
6. Атрошенко Ю.К., Озерова И.П., Стрижак П.А. Влияние теплового контакта на результаты измерений поверхностных термоэлектрических преобразователей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – № 1 (214). – С. 97–105.
7. Atroshenko Y. K., Abramova A.V. and Strizhak P. A. Research of Integral Characteristics of Process of Heattransfer in the Sensitive Element of Resistive Temperature Detector // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 37, 01041.
8. А.А. Самарский. Теория разностных схем. М.: Наука. 1989. – 616с.
9. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle. International Journal of Heat and Mass Transfer. ,Vol. 53, Is. 5–6, 2010. – P. 923 –930.
10. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины: справочник. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 1232 с.

#### ОБРАЗОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН ПРИ ЗАКАЧКЕ ГАЗА В ПЛАСТ

**Р.О. Ахунов, И.А. Синцов**

Научный руководитель доцент И.А. Синцов

**Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, Россия**

При реализации опытно-промышленных работ по применению водогазового воздействия на объекте Ю<sub>1</sub><sup>1</sup> Новогоднего месторождения в нагнетательной скважине 6569 в ходе полуцикла закачки газа наблюдалось резкое снижение приемистости.

Следует отметить, что снижение приемистости при последовательной закачке газа и воды является достаточно часто встречаемым явлением. Однако снижение приемистости, в большинстве случаев, происходит при смене вытесняющего агента с воды на газ, что обуславливается снижением относительной фазовой проницаемости для газа [1].

В данном случае снижение приемистости происходило в ходе полуцикла закачки газа, что никак не объясняется изменениями фазовой проницаемости по газу. При этом скин-фактор возрос от 0 до 30 за период, равный 2 месяцам. В результате чего мощностей компрессорных станций стало недостаточно для продавливания газа в пласт. Скважина была остановлена. Подобное явление в практике ранее не встречалось и требует дополнительного изучения.

После отстоя скважина вновь была пущена в работу со сменой вытесняющего агента на воду, при этом приемистость по воде не снизилась, что свидетельствует об отсутствии разрушений в призабойной зоне, влияния кальматации и т.д. [2].

Поскольку вытесняющим агентом являлся газ можно предположить, что причиной стремительного роста скин фактора является отложение газовых гидратов в порах призабойной зоны скважины. Образование гидратов при текущих пластовых температуре и давлении ( $T=367$  К,  $P_{пл}$  порядка 20 МПа) невозможно, однако